第18回 人体と電磁波(その2)

小暮裕明

ボードの記事　ビギナーズ

前回(本誌2006年2月号，pp.91-97の第17回)は電磁波を伝える誘電体線路について学びました．人体は誘電体としてモデリングできますが，さまざまな部位に集中するエネルギー量を評価するSAR(比吸収率)についても，電磁界シミュレータを活用して詳しく調べました．急速に進展するユビキタス・システムですが，主役である人間がモバイル装置を身につけることで実現されます．このことから，人体の電気的特性をより詳しくモデリングすることが求められます．生体組織は周波数依存性がある誘電体として定義されます．異なる周波数を使うシステムが複数混在する場合は，分散性を考慮したシミュレーションによって人体の影響を正しく評価する必要があります．

(筆者)

1．人体のモデル

前回(連載第17回)は，TLM(transmission line matrix)法による3次元電磁界シミュレータ(1),(2)Micro-Stripes注1を使って人体頭部のSARを求めました．生体組織は，電気的には損失のある誘電体として表されますが，等価回路では並列に接続されたC(コンデンサ)とR(抵抗)で表現できました(図1)．

この連載を初めから読まれている読者の方なら，筆者がかつて超高圧変電所の下で「電界」を体感したエピソードを覚えていることでしょう(図2，本誌2004年3月号，pp.115-122の連載第2回を参照)．学生時代に電磁気学の授業で「高圧線の下にいる人間は等価的にコンデンサである」と教わった意味が，SARの考えかたからもうかがえますが，人体細胞をコンデンサで表すというのは何とも大胆なマクロ的モデルです．

しかし人体の各部を表現する誘電体のパラメータは，携帯電話のようなGHzオーダの高周波と，静電界や送電線のように低い周波数では，その値が大きく異なります．シミ

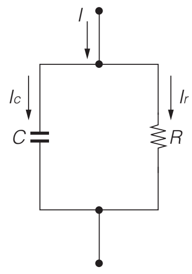


図1 生体組織の等価回路
並列に接続されたC(コンデンサ)とR(抵抗)で表現できる．

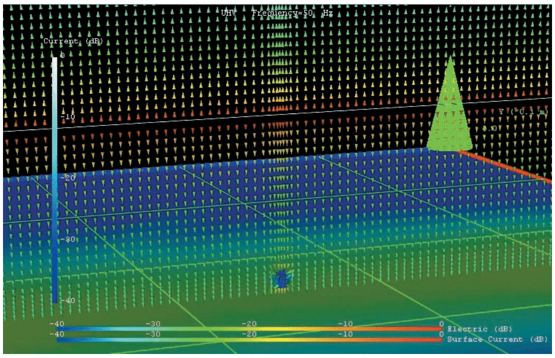


図2 超高圧線の下に立つ人間を含む空間の電界
人体を模した誘電体付近の電界ベクトルに影響を与えている．

注1：Micro-Stripes(マイクロストライプス)のWebサイトのURLは，「http://www.flomerics.com/microstripes/」．

KeyWord　Micro-Stripes，周波数分散性，誘電率，導電率，Debyeのモデル，比誘電率，電子レンジ，ファントム，SAR評価液剤，ダイポール・アンテナ，ループ・アンテナ，パッチ・アンテナ，Sonnet

ュレーションの精度を高めるためには，さらに複雑な表現方法が必要になります．

モーメント法や有限要素法による周波数領域の電磁界シミュレータ[(1), (2)]では，誘電体や磁性体の特性値は，求めたい周波数範囲における代表値（例えば中心の周波数における値）を設定します．このため，広帯域に渡るシミュレーションで計算精度を高めるためには，特性値が変化する周波数範囲に分けて，設定を変えた結果を集めて評価します．

一方，TLM法やFDTD（finite difference time domain）法による時間領域の電磁界シミュレータ[(1), (2)]では，離散化されたセル[注2]が細かいほど解析周波数の上限が高くなります．誘電体や磁性体の特性値は，広帯域の変化を表現して設定する必要があります．

● 誘電体の分散性とは

回路基板などの誘電体材料の特性値は，電磁界の大きさや方向に依存しない一定値でシミュレーションします．しかし，一般には誘電体や磁性体の材料は異方性を示す媒質[注3]です．また，これらの材料は，周波数が異なると特性値も異なります．この性質を周波数分散性，あるいは単に分散性（dispersive）と呼んでいます．透磁率についても誘電率と同じことがいえるのですが，ここでは誘電率に絞って説明します．

誘電率は複素数で次式のように表されます（連載第17回を参照）．

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad \cdots\cdots (1)$$

また，シリコンなどの導電性材料では導電率σを設定します．この場合の誘電率は，

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' - (j\sigma / \omega) \quad \cdots\cdots (2)$$

となります．第3項には角周波数を表す$\omega = 2\pi f$がありますから，これは分散性を示しています．

● 生体組織の分散性モデル

生体組織の周波数依存性は，式（2）よりも複雑な関数で表現されます．このような，より複雑な分散性媒質を表現する方法の一つに「Debyeのモデル」があります．Micro-Stripesのリファレンス・マニュアルによれば，Debye

表1　比誘電率の10点のデータ
実測値ではなく筆者が作成した値である．

周波数（GHz）	比誘電率（実部）	比誘電率（虚部）
1	7	1.6
2	6	2
3	5	1.8
4	4.5	1.5
5	4.3	1.1
6	4.2	1
7	4.1	0.8
8	4.1	0.7
9	4	0.7
10	4	0.6

注2：電磁界シミュレータは，ディジタル・コンピュータで解くために解析空間を細かく離散化して計算している．このときモデルを細分化した最小単位をセルと呼んでいる．
注3：異方性媒質とは，物理的な性質が方向によって異なる誘電体や磁性体．

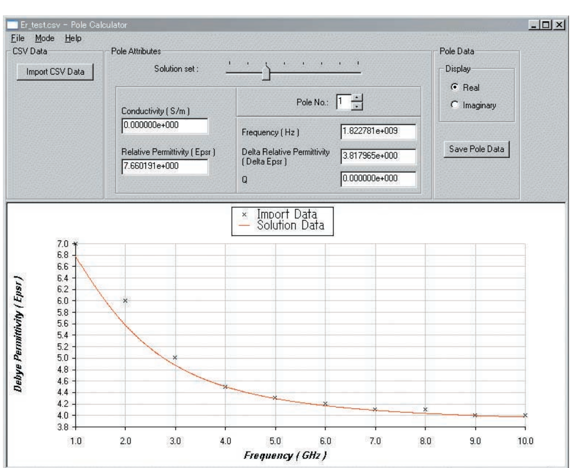


図3　分散性媒質の比誘電率の実部
Debye Calculatorを使って表示した．

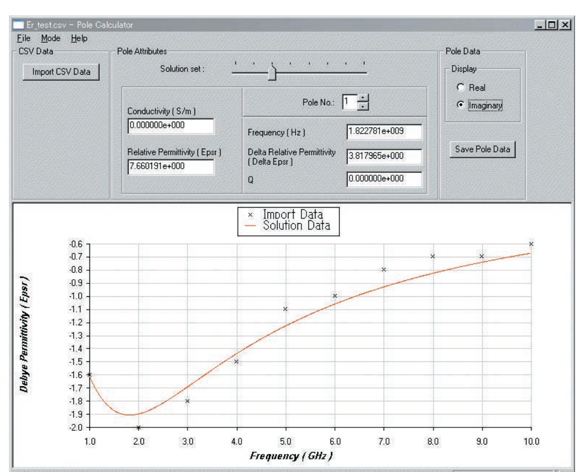


図4　分散性媒質の比誘電率の虚部
図3と同じく，Debye Calculatorの画面を示す．

materials（ディバイ型材質）注4の電界または磁界の分極率はシンプルな極（pole）注5で表され，周波数fに依存するディバイ型材質の複素比誘電率は次のように表現されます．

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty} + \sum_{n=1}^{N} \frac{\Delta\varepsilon_{rn}}{1 + jf/f_n} \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで$\varepsilon_{r\infty}$は無限の周波数における比誘電率，$\Delta\varepsilon_{rn}$は周波数f_nにおける，n番目の極と関連する比誘電率の微小変化量

式(3)は，周波数領域における比誘電率の表現です．実際にはいくつかの周波数で測定した値を得ているので，その変化を表す曲線にもっともフィットするためのパラメータを決めなければなりません．そこでMicro-Stripesにユーティリティとして用意されているDebye Calculatorというツールを使って入力する値を得ます．

誘電率の測定法については別の機会に譲り，ここではすでに**表1**のような測定データが得られているものとします（実測値ではなく筆者が作成した値）．Excelなどの表計算ソフトウェアに周波数(Hz)，比誘電率（実部），比誘電率（虚部）の順で入力し，これをカンマ区切りのcsvフォーマットで保存してから，Debye Calculatorに取り込み，上部のスライダ・バーでもっともフィットする曲線を捜します．

図3は比誘電率の実部，**図4**は虚部の画面です．このときの極の周波数やDelta Epsr（比誘電率の微小変化量）などをモデルに入力します．保存したデータをグラフ表示（**図5**）すると，**表1**で与えた10点のデータから連続した曲線が得られていることを確認できます．

ライブラリとして登録されている生体組織の分散性モデルのデータ（連載第17回を参照）は，このようにして測定値から得たものと考えられます．なお，透磁率の分散性モデルについても同様の方法で得られます．Debye Calculatorでは，Modeプルダウン・メニューで「Permeability」に切り替えます．

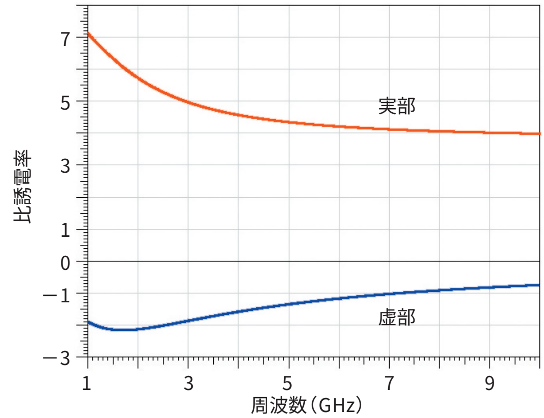


図5　定義した分散性媒質の比誘電率
10点のデータから連続した曲線が得られている．

2. 人体の温度上昇と電磁界

図6はMicro-Stripesによる電子レンジのモデルです．食品を入れる部屋の寸法は35cm×32cm×26cmで，右下の開口部に導波管をつなげて励振しています．回転皿の上に置いたジャガイモは，**図7**に示すように誘電体で表現して

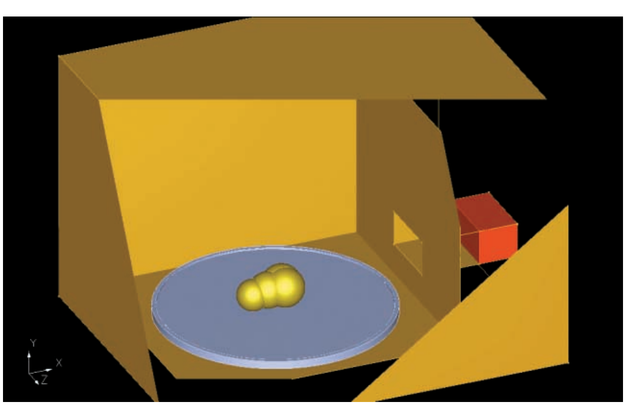


図6　Micro-Stripesによる電子レンジのモデル
食品を入れる部屋の寸法は35cm×32cm×26cmで，右下の開口部に導波管をつなげて励振する．

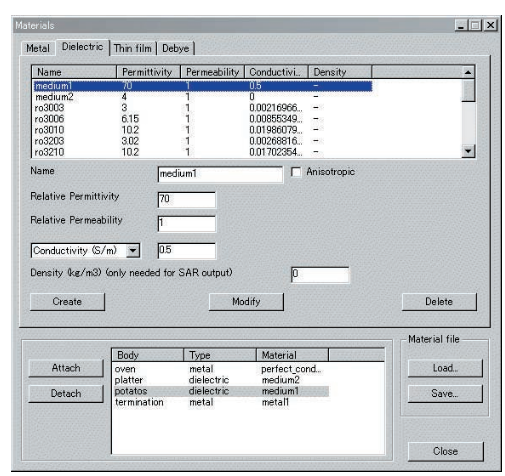


図7　誘電体を設定するダイアログ
比誘電率＝70，導電率＝0.5（S/m）に設定する．

注4：Debye materials（ディバイ型材質）とは，P. Debyeによって表現された分散で，周波数依存性のある誘電率や透磁率を表せる(6)．
注5：極（pole）とは，伝達関数（入力xと出力yを$y=f(x)$として表した関数）の分母多項式を0とする根．

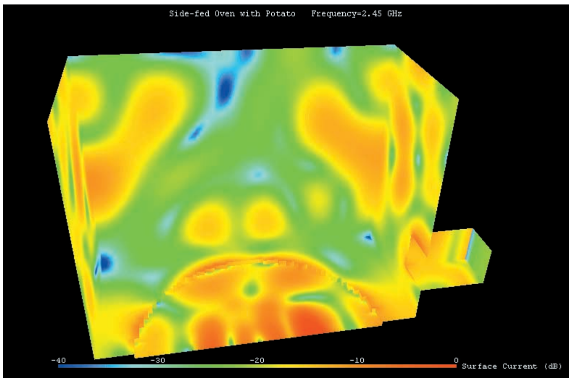


図8　電子レンジの部屋を構成する壁表面の電流分布のRMS（実効値）表示

2.45GHzでは部屋の上部に弱い場所もあって，分布にはムラがある．回転皿の近くは表面電流が強い．

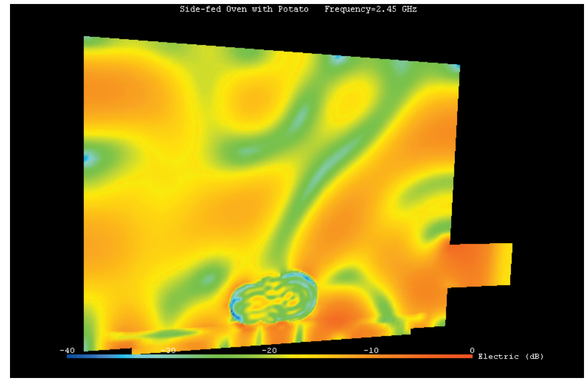


図9　ジャガイモの中央を通る断面における電界強度分布のRMS（実効値）表示

内部にも強い電界が認められるが，細かい強弱のムラが発生している．

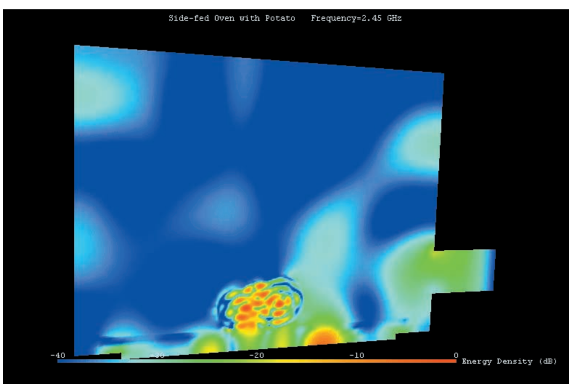


図10　エネルギー密度（J/m^3）の時間平均表示

ジャガイモの内部に集中している．

おり，比誘電率＝70，導電率＝0.5（S/m）に設定しました．

● 電子レンジによる加熱のしくみ

実際の電子レンジは，マグネトロン[注6]という装置で強いマイクロ波を励振しており，無線LANやBluetoothなどで使われる2.45GHzの電磁波を使用しています．このため，キッチンの隣にある筆者のホーム・オフィスでは，無線LAN接続のプリンタが動作しているときに近くの電子レンジで調理を始めると，印刷が急に遅くなります．長年の使用でレンジのドアがゆるむなどして，わずかな隙間（スリット部）から電磁波が漏れることもあるのでしょう．

図8は電子レンジの部屋を構成する壁表面の電流分布のRMS（実効値）表示です．面に平行な強い磁界が集中するほど，誘導される表面電流は強いと考えられます．2.45GHzでは部屋の上部に弱い場所もあって，分布にはムラがあることがわかります．また回転皿の近くは表面電流が強いので，調理にはつごうが良いようです．

図9はジャガイモの中央を通る断面における電界強度分布のRMS（実効値）を表示しています．比誘電率を70で設定したジャガイモの内部にも強い電界が認められます．しかし，細かい強弱のムラも発生しているので，平均的に加熱するためには，皿を回転するか電磁界の分布を乱すようなファンを設けるくふうが必要でしょう．

ここでジャガイモは均一な媒質としてモデリングしています．しかし，比誘電率が70と大きいので，波長短縮率（本誌2005年4月号，pp.136-144の連載第10回を参照）は0.1に近くなり，10cmほどのジャガイモの中に2.45GHzの電磁波が何波長分か分布し，**図9**のような模様が現れると考えられます．

図10はエネルギー密度（J/m^3）の時間平均を表示したものです．ジャガイモの内部に集中しているようすがわかります．導電率を0.5（S/m）に設定しているので，SARの定義式$\sigma E^2/\rho$（連載第17回を参照）からもわかるように，導電率σに比例してエネルギーが吸収されています．

● ファントムの温度上昇

人体頭部と携帯電話のモデルでは，900MHzにおける眼球の比誘電率＝67.9，導電率＝1.68（S/m）などの値を参考に設定しました（連載第17回を参照）．これらの値は，ジャガイモのモデルに近いので，電磁波を照射したときの温度上昇を測定してSARを評価する方法もあります．

アマチュア無線家（ハム）がマイクロ波帯のハンディ・ト

注6：マグネトロンは磁界と電界の作用で発振を起こさせる電子管で，磁電管ともいう．

表2　電波の強度値の指針値（電波法）

周波数 f	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]	電力束密度 S [mW/cm^2]
10kHz～30kHz	275	72.8	―
30kHz～3MHz	275	$2.18f$ [MHz] $^{-1}$ (72.8～0.728)	―
3MHz～30MHz	$824f$ [MHz] $^{-1}$ (275～27.5)	$2.18f$ [MHz] $^{-1}$ (0.728～0.0728)	―
30MHz～300MHz	27.5	0.0728	0.2
300MHz～1.5GHz	$1.585f$ [MHz] $^{1/2}$ (27.5～61.4)	f [MHz] $^{1/2}$/237.8 (0.0728～0.163)	f [MHz] /1500 (0.2～1)
1.5GHz～300GHz	61.4	0.163	1

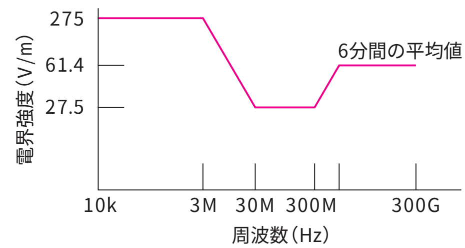


図11　周波数と電界強度（V/m）の指針値の関係
30MHz～300MHzの値が小さくなっている．

ランシーバの出力を上げて違法運用し続け，ついには白内障になってしまったという事故がありました．眼球が半熟状態になるほど温度が上昇してはたまりませんが，温度上昇値を直接観測する人体実験はできませんから，「ファントム」と呼ばれる人体模型が使われます（ボンレス・ハムで代用することもあるらしい）．

ファントムには液体と固体があります．いずれも頭部など，人体部位の寸法・形状に近づけて，人体と等価な誘電率と導電率特性をもつ材料で作られます．液体ではSAR評価液剤として，周波数に応じた頭部，胴体，筋肉の各等価液剤が商品化されています[注7]．

固体では頭部のファントムがありますが，例えば耳の近くにアンテナを置いて電磁波を照射し，赤外線カメラによるサーモグラフィ装置で温度を観測します．

このときSARは次の式から求められます．

$$SAR = C\frac{\partial K}{\partial t} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで C：比熱［J/（K・kg）］，K：温度［K］，t：時間［s］．Kはケルビン温度だが，セ氏温度でもよい

SARの単位はW/kgでした（連載第17回を参照）．式（4）は温度を使った式ですが，次のようにSARの次元を考えると，2種類の定義は同じものであることがわかります[(3)]．

$$SAR = \left(J\theta^{-1}M^{-1}\right)\left(\theta T^{-1}\right)$$
$$= \left(JT^{-1}M^{-1}\right)$$
$$= \left(WM^{-1}\right)$$

ここで J：熱量ジュールの次元，θ：温度の次元，
M：質量の次元，T：時間の次元，W：電力ワットの次元
ジュール（J）はワット（W）と秒（s）の積

● ハムの電界規制

筆者は長年ハムを趣味としており，ベランダに小型アンテナを設置しています．第1級アマチュア無線技士は空中線電力1kWまで運用できるようになったので，「強い電波を浴びない，浴びせない」ことがハムにも求められるようになってきました．平成11年（1999年）には電波法に電波の強度値の規定が追加され，**表2**のような指針値が示されました．これは電磁波による人体への熱作用や刺激作用について，「電波により人体に悪影響を及ぼさない範囲を定めた電磁界強度の指針値」です．

周波数と電界強度（V/m）の指針値の関係は**図11**のようになっています．30MHz～300MHzの値が小さくなっているのが目立ちます．これは人体の寸法に波が乗ることで共振し，SARの値がより大きくなることを考慮していると考えられます[(4)]．

筆者はおもに短波帯で運用しているので，例えば14MHzの場合は，**表2**から，

$$電界強度 = 824f^{-1} = 824/f(\mathrm{MHz}) = 58.9\ (\mathrm{V/m})$$

が指針値となります．

どの方向へも均一に放射するアイソトロピック（等方性）アンテナを考え，波面の球の半径をR（m），表面積をS（m^2）とすれば，球面を通過する全電磁エネルギーP_sがアンテナの入力電力Pに等しいとして，

$$P = P_s \times S = \left(E^2/377\right)\times 4\pi R^2 = E^2R^2/30\quad [\mathrm{W}] \cdots(5)$$

式（5）から，電界Eについて変形すれば，

$$E = \frac{\sqrt{30P}}{R}\quad [\mathrm{V/m}] \quad \cdots\cdots(6)$$

注7：SAR評価液剤は，例えば，NTTアドバンステクノロジが扱っている（製造元は関東化学）．「http://www.ntt-at.co.jp/product/sar/」を参照．

また，式(6)から距離Rについて求めると，例えば200Wの送信機では，アンテナから1.3m以内には立ち入れない設備にする必要があることになります．

式(6)は，実際には作れない仮想的な等方性アンテナの場合です．ベランダでよく使われる1/4波長のモノポール・アンテナでは，次の式が使われます．

$$E = \frac{9.9\sqrt{P}}{R}\ \ [\mathrm{V/m}] \quad \cdots\cdots(7)$$

式(7)によれば，200Wで2.4mになりますから，隣接する住人へ悪影響を及ぼさない範囲を考慮すれば，運用電力はこのあたりが限度でしょう．マンションのベランダ・アンテナでは，1kWのリニア・アンプはあきらめざるをえません．

3．そのほかの影響

頭部に密着して使用する携帯電話では，眼球や脳をはじめ，各部位におけるSARの値をできる限り小さくするアンテナ設計が求められます．

● 人体の近くで使われるアンテナ

ハンディ・トランシーバや携帯電話では，当初から1/4波長のモノポール・アンテナや1/2波長のダイポール・アンテナが使われています．**図12**は空間に設置されたダイポール・アンテナの周りの電界強度[(5)]を色で表示しています．頭部は電界の強い場所に置かれることがわかります．

アンテナの周りの電磁界分布は，エレメントの形状や寸法によって決まります．このため頭部の近くにありながら，

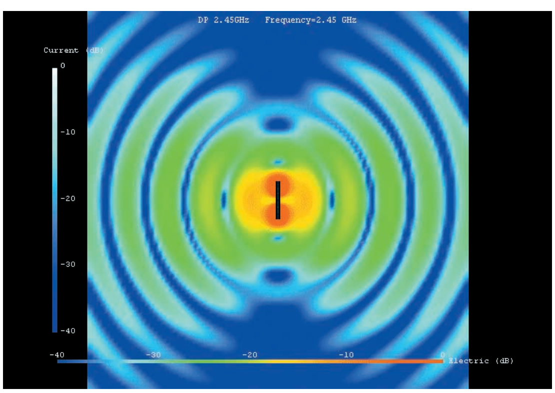


図12　空間に設置されたダイポール・アンテナの周りの電界強度[(5)]
頭部は電界の強い場所に置かれる．

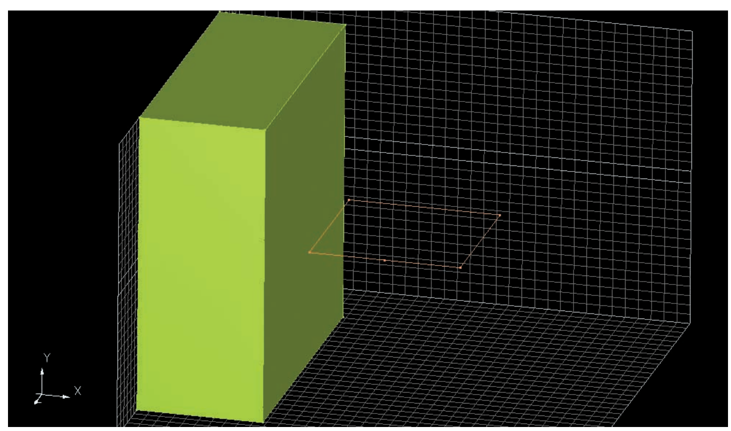


図13　人体を模した誘電体ブロックの近くにループ・アンテナを置いたモデル
クワッド・アンテナとして1波長の波が乗った状態をシミュレーションした．

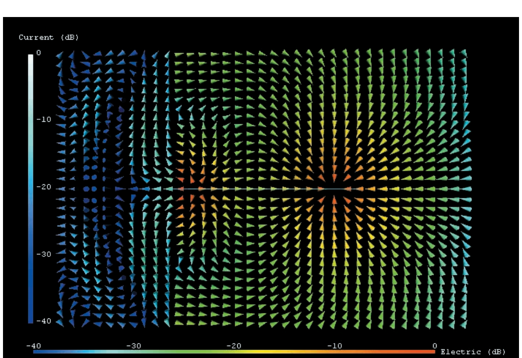


図14　共振周波数に近い315MHzにおける電界ベクトルのようす
ループの中心を含む断面を表示している．ループ全体を含む右側の自由空間の電界と，人体を模した誘電体内の分布は大きく異なる．

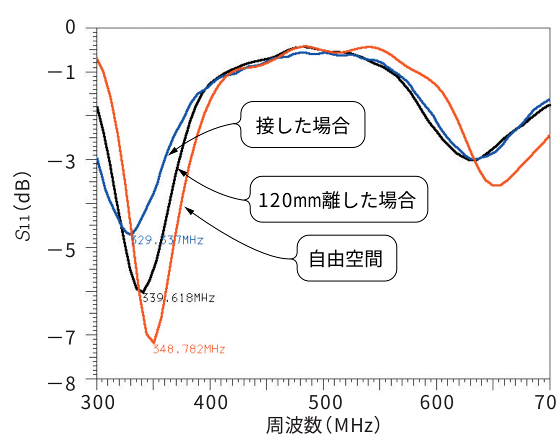


図15　反射係数 S_{11} のグラフ
赤は自由空間，黒はアンテナを身体から120mm離した場合，青は人体にほぼ接した場合．

頭部の占める領域で電磁界の強度を抑えるのは，一見矛盾しているようにも思えます．

これにチャレンジした例の紹介は，誌面のつごうで別の機会に譲ります．ここでは電磁波が人体を貫通してしまうことで，アンテナの寸法を調整する必要があるかについて調べます．

図13は人体を模した誘電体（比誘電率＝25）のブロック近くに，エレメント長96cmのループ・アンテナを置いたモデルです．これは微小ループではなく，クワッド・アンテナとして1波長の波が乗った状態をシミュレーションしました．

図14は共振周波数に近い315MHzにおける電界ベクトルのようすで，ループの中心を含む断面を表示しています．ループ全体を含む右側の自由空間の電界と，人体を模した誘電体内の分布は大きく異なっていることがわかります．

波長短縮効果は，誘電体を通過する電磁波の速度が遅くなるのが原因ですから，空間と誘電体内の電磁エネルギーの割合によって効果の大きさが異なります．そこでアンテナを身体から120mm離した場合と比較してみました．

図15は反射係数を表すS_{11}のグラフです．もっとも高い周波数349MHz付近は自由空間におけるモデルの結果で，人体に近づくほど共振周波数が低くなっていることがわかります．周波数のシフト量は誘電率によって異なるので，シミュレーションの精度を高めるためには，人体の正確な分散性モデルが必要です．

事前にこのような評価を行っておけば，人体に装着するアンテナは，自由空間で測定しながら最適化が可能になるでしょう．

● 手で持つアンテナ

FeliCa（フェリカ）に代表される13.56MHzの非接触ICカード（本誌2005年5月号，pp.133-140の連載第11回と本誌2005年6月号，pp.133-140の第12回を参照）は，おもに手で持ったまま使われます．しかし，波長が約22mと長いため，電磁波が手を通り抜けても，その影響は小さいと考えられます．

一方，社員証などのIDシステムで使われる2.4GHz帯は波長が約12cmなので，手で持ったり首から下げたりした状態では周波数のシフト量は大きくなるでしょう．このためか，片面にグラウンドを持つパッチ・アンテナがよく使われています．

図16はSonnet[注8]による2.4GHzのICカードのモデルです[(2)]．エレメントが細長いのでダイポール・アンテナに見えますが，グラウンドを持つのでパッチ・アンテナとして動作します．

図17はエレメント表面の電流分布です．2.4GHz付近で1/2波長の波が乗っているように見えます．一見この電流が放射に寄与しているように見えますが，パッチ・アンテナはマイクロストリップ・アンテナとも呼ばれているように，直下のグラウンドには反対方向の電流が流れていることを忘れてはなりません．このようにマイクロストリップ線路の一部と考えれば，放射は少ないと言えます．

ではどこから放射しているのでしょうか．エレメントの両端は**図17**では電流がほとんど流れていませんが，グラ

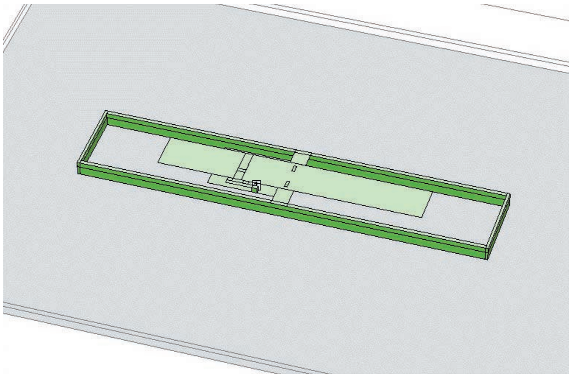


図16　Sonnetによる2.4GHzのICカードのモデル
パッチ・アンテナとして動作する．

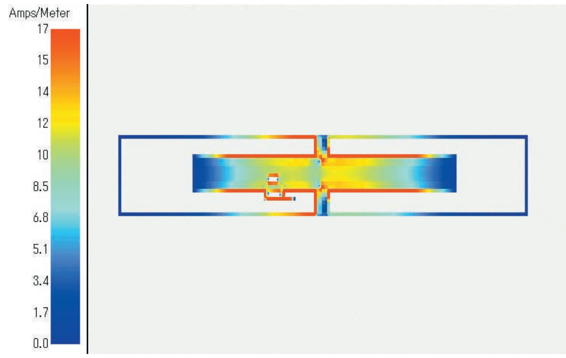


図17　エレメント表面の電流分布
2.4GHz付近で1/2波長の波が乗っている．

注8：無償版のSonnet Liteは，本誌付属のCD-ROMに収録されている．Sonnet技研のWebサイト「http://www.sonnetsoftware.co.jp/」からもダウンロードできる．電磁界シミュレーションの使用事例は，参考文献(1)，(2)を参照．

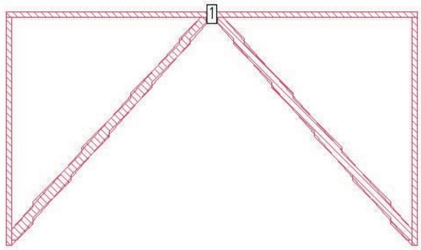


図18　蝶ネクタイ(bow tie)型フレームのアンテナ(Sonnetモデル)
1/2波長のダイポール・アンテナの広帯域化を試みたアンテナである．

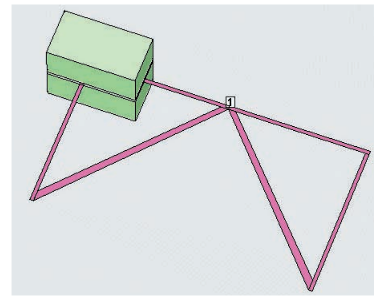


図19　エレメントの左上を指でつまんだモデル
自由空間で953MHz付近にS_{11}の最良点がくるようにしたのち，誘電体ブリックを追加してエレメントの左上をつまんだモデルである．

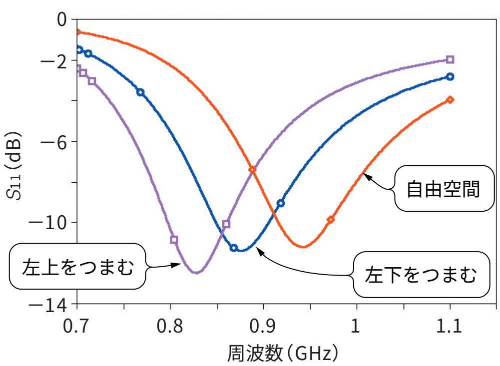


図20　S_{11}の比較
オレンジは自由空間，青は左下を指でつまんだモデル，紫は左上を指でつまんだモデル．

ウンドとの間の狭い空間には強い電界が分布しています．また，このとき電界強度は両端の領域でもっとも強くなっています．電界ベクトルは金属表面に対して垂直ですから，末端付近には空間へ広がる電界が発生します．これが押し出されることによって電磁波が放射されると考えられるので，この部分に人体や手があれば，その影響は大きくなると考えられます．

最近，900MHz帯RFIDシステムの開発が本格化してきましたが，波長が30cm程度なので，ダイポール・アンテナが採用されています．このため金属の近くやガラスなどの誘電体に貼ると，共振周波数はシフトします(連載第10回を参照)．

図18のSonnetモデルは，1/2波長のダイポール・アンテナの広帯域化を試みた，蝶ネクタイ(bow tie)型フレームのアンテナです．900MHz帯用で，ICカードに収まる寸法で設計しました．自由空間で953MHz付近にS_{11}の最良点がくるようにしたのち，誘電体ブリックを追加してエレメントの左上をつまんだモデルを作りました(図19)．

両者の違いをS_{11}で比較すると，図20のようになりました．左下をつまんだ場合も追加してありますが，指の位置によって周波数のシフト量が異なり，波長短縮効果の違いを予測するのは難しいようです．

4.まとめ

生体組織を誘電体として定義することで，人体の電気的特性に基づくシミュレーションが行えることを学びました．広帯域のデータを求める場合は，複素誘電率の周波数依存性を設定できる機能が必要です．人体は誘電体の中では導電率が大きく，電磁エネルギーを取り込みやすいこともわかりました．これらの考察から，人体に密着して使われるユビキタス・システムのアンテナは，あらかじめ周波数シフト量を加味した設計が必要になります．

次回はこれらの知見を踏まえて，小型化した誘電体アンテナについて調べ，低SARを実現する方法について解説する予定です．

参考・引用*文献

(1) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界，CQ出版社，2003年(第6版)．
(2) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界，CQ出版社，2003年(第2版)．
(3) 吉本猛夫；生体と電磁波，CQ出版社，2004年(初版)．
(4) JARL技術委員会 電磁環境分科会；電磁環境とアマチュア無線，JARL NEWS，pp.20-21，1999年2月．
(5) 小暮裕明；電磁界シミュレータで見る2.4GHz帯の電磁干渉問題，Design Wave Magazine，pp.31-39，2005年7月．
(6) 宇野 亨；FDTD法による電磁界およびアンテナ解析，コロナ社，1998年(初版)．

こぐれ・ひろあき
小暮技術士事務所・技術士(情報工学部門)
http://www.kcejp.com/